第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素

常 帅[1]， 于红博[1]， 曹聪明[1]， 马梓策[1,2]， 刘月璇[1]， 李 想[1]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；
2. 安徽师范大学地理与旅游学院，安徽 芜湖 241199）

摘 要：土壤有机碳是土壤养分评测和质量分析的重要指标之一，研究不同草原类型土壤有机碳的空间分布规律有利于草地的生态恢复和土地的合理利用。以锡林郭勒草原为研究对象，运用克里格插值法、相关性分析法、一元线性回归法和主成分分析法探讨土壤有机碳的空间分异规律，以期揭示不同影响因素对草原土壤有机碳的影响程度。结果表明：(1) 在草甸草原中，土壤有机碳含量在0~10 cm、20~30 cm、40~50 cm土层的含量依次为23.28 g·kg^{-1}、12.71 g·kg^{-1}、9.28 g·kg^{-1}；在典型草原中，含量变化依次为16.75 g·kg^{-1}、10.75 g·kg^{-1}、7.20 g·kg^{-1}；在荒漠草原中，含量依次为1.62 g·kg^{-1}、2.00 g·kg^{-1}、1.73 g·kg^{-1}。表明草甸和典型草原土壤有机碳含量随土壤深度增加而逐渐降低，而荒漠草原不同土层间无显著性差异。(2) 不同草原类型对土壤有机碳含量的影响程度不同，对于同一土层深度，基本表现为草甸草原>典型草原>荒漠草原。水平方向上有机碳含量与植被盖度分布相一致，呈由东南向西北逐渐递减的趋势。(3) 在对影响因素的分析中，土壤有机碳与海拔、气温、pH均呈极显著负相关关系($P<0.01$)，与降水、土壤含水量、速效氮、速效磷呈极显著正相关关系($P<0.01$)，与坡度、坡向、速效钾无明显相关性关系($P>0.05$)。(4) 影响土壤有机碳的主要因子为速效氮、降水量和气温，次要因子为土壤含水量和速效钾，因此，应注重对不同草原氮素的摄入以及水热条件的把控。

关键词：土壤有机碳；分布特征；影响因素；锡林郭勒草原

土壤有机质是指以各种形态存在于土壤中的所有含碳的有机物质，是土壤肥力乃至土壤质量的重要基础物质，是植物生长发育的直接养分来源[1]。其中，土壤有机质大多以有机碳的形式存在，通过碳源或碳汇的形式形成碳循环，进而存在于陆地生态系统中，在各种因素的影响作用下，有机碳会在不同的生态环境中具有不同的空间分布特性[2-3]。因此，研究土壤有机碳的空间分布特征，对于土壤肥力的评价及其植被的生长等具有重要的意义[4]。

对于土壤有机碳的空间分布研究，主要体现在水平方向和垂直方向两个方面。在土壤有机碳的水平分布方面，李灵等[5]、谭海燕等[6]、王勇辉等[7]分别研究了武夷山市茶园、昆明市滇池耕地、艾比湖湿地等地区土壤有机碳水平方向上的变化特征，揭示了不同土地利用类型对土壤有机碳的空间分布影响。而胡莹洁等[8]、马和平等[9]、曹生奎等[10]，分别研究了北京市平原区、西藏色拉山、青海湖湿地等3个地区的土壤有机碳垂直分布的变化特征，并分析了不同深度土层有机碳的变化特征。在分析不同地区土壤有机碳含量的分布特征方面，学者们采用多种方法对土壤有机碳的影响因素进行了研究，结果亦不相同[11-13]。李兰花等[14]采用了相关性分析法对内蒙古草原土壤有机碳的影响因素进行了分析验证，结果表明土壤有机碳与土壤含水量和土壤全氮呈显著性相关。黄先飞等[15]研究发现土地利用方式是影响有机碳含量的一个重要因子。李龙等[16]揭示了地形因子对有机碳含量具有重要影响。丰思捷等[17]采用冗余分析法分析了不同植被类型对土壤有机碳的影响，表明不同的植被类型对有机碳含量的影响也不尽相同。Motavalli 等[18]研究了热带森林土壤pH与土壤有机碳之间的相互作用关系。商泽安等[19]在对海南岛次生雨林地区土

收稿日期：2020-10-25； **修订日期：**2021-02-01
基金项目：国家自然科学基金(41661009)
作者简介：常帅(1997-)，男，硕士研究生，主要从事生物地理学方面的研究. E-mail: 1904591195@qq.com
通讯作者：于红博. E-mail: 1106275721@qq.com

壤有机碳和其他因素相关性分析中，发现土壤有机碳的含量和全氮、速效氮、速效磷均具有极显著的正相关关系，表明了土壤有机碳与养分指标之间的相互作用关系。

锡林郭勒草原是内蒙古草原的重要组成部分之一，对其土壤有机碳的研究具有重要作用。通过对前人研究分析，在对土壤有机碳空间分布及其空间分异的研究上，由于研究尺度，研究范围，研究区特点的不同，导致研究结果多样化，由于内蒙古草原在地理上的特殊性及其人文环境的影响，致使对于不同草原类型土壤有机碳在水平方向和垂直方向的空间变化尚不明确。又因为土壤有机碳受多重影响因素的共同作用。基于此，为探究不同影响因素对其的影响程度，以锡林郭勒天然草原为研究区，分析草甸草原、典型草原和荒漠草原不同草原类型土壤有机碳的空间分布特征，探讨气象因子、地形因子、土壤含水量、土壤理化性质等对于草原土壤有机碳的影响，揭示在众多影响因素中，影响有机碳的主控因子，为草原生态系统的稳定以及土壤质量健康发展提供基础参考和理论支持。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原处于内蒙古自治区中部地区，是内蒙古四大草原之一，隶属于锡林郭勒盟（图1）。其地理位置为41°34′22.8″~46°46′1.2″N，111°8′42″~120°7′30″E，海拔760~1936 m，面积20.3×10^4 km^2。气候类型属于温带干旱与半干旱气候，年降水量在130~350 mm，降水主要集中在7—8月，年均温为2.5 ℃。锡林郭勒草原主要有3种草原类型，草甸草原、典型草原、荒漠草原[20]。优势物种分别为贝加尔针茅（*Stipa baicalensis*）和线叶菊（*Filifolium sibiricum*）、克氏针茅（*Stipa krylovii*）和大针茅（*Stipa grandis*）、小针茅（*Stipa klemenzii*）。土壤类型从东至西依次为黑钙土、淡黑钙土、草甸栗钙土、栗钙土、棕钙土等。

1.2 数据采集与来源

为研究不同草原类型对土壤有机碳的影响作用程度，在研究区内结合地形、植被类型等从东至西共设置了30个采样点，按照由西向东采样，途经锡林郭勒盟6个旗县，分别为苏尼特右旗、二连浩特市、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、锡林浩特、东乌珠穆沁旗（图1），其中在草甸草原区布设9个样点，在典型草原区布设12个样点，在荒漠草原区布设9个样点。在每一个样点中采取挖剖面的方式取样，一方面为了保证各层之间取样不受污染，减小误差；另一方面，由于草原地区植被多为根系较短植物，根系多分布在表层，经挖剖面可知，土层深度在20~30 cm为钙积层的转折点，30 cm以下基本上为钙积层，为充分保证研究草原的有机碳含量特征差异，因而采用隔层取样。样地采样深度为0~50 cm，3个土层分别为0~10 cm、20~30 cm、40~50 cm，在每个样点呈三角形分别取样3次，通过挖剖面的方式收集样品，共计样品270个，将采集的土样装在牛皮纸袋

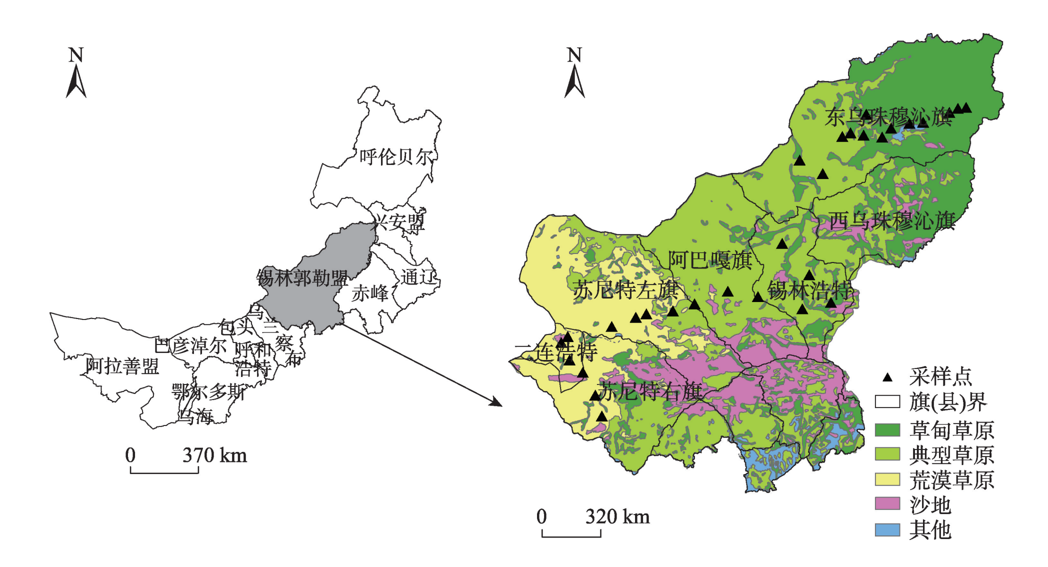


图1 研究区位置、草原类型及采样点示意图

Fig. 1 Location, steppe type and sampling point of the study area

里,待其在实验室内自然风干后,去除大的砾石和根系物,过1 mm尼龙筛备用。

为准确分析土壤有机碳与各个影响因子之间的相互作用关系,特选用地形因子(海拔、坡度、坡向)、气象因子(多年均温、多年降水)、土壤质地(黏粒、砂粒、粉砂粒)、土地利用类型、土壤类型等数据来分析不同草原类型土壤有机碳的影响,及其含量的控制因子。地形因子选用DEM数据(空间分辨率90 m),其来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn);1995—2015年的年均温数据和年均降水数据以及其余因子均来源于资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)。

1.3 研究方法

1.3.1 *实验测定方法*　土壤有机碳采用重铬酸钾容量外加热法,pH采用电位极法,速效钾采用NH_4OAc浸提火焰光度法,速效磷测定采用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$钼锑抗比色法,速效氮采用碱解扩散法[21]。

测定土壤含水量的土壤样品装置在60 mm×60 mm的铝盒内,烘干前称重M_1(为铝盒+土壤的湿重,g),放置在温度为105 ℃的烘箱中烘至恒重,烘干后计量称重M_2(为铝盒+土壤干重,g),土壤质量含水量计算方法如下:

$$SW=\frac{(M_1-M_2)}{(M_2-M_0)}\times 100\% \tag{1}$$

式中:SW为土壤含水量(%,干基),M_0为土壤所盛铝盒的重量(g)。

1.3.2 *变异系数*　变异系数(CV)也称为离散系数,是反映一组数据中各测量值变异程度的一个统计量,只在平均值不为零时有意义,常用标准差与平均值的比值来计算[22],计算公式如下:

$$CV=\frac{SD}{AV}\times 100\% \tag{2}$$

式中:CV表示变异系数;SD表示该组数据的标准差;AV表示同一组数据的平均值;CV值越大,说明以均值为准的变异程度越大,离散趋势变化亦明显,反之,CV值越小,则表明其变异性也越小。衡量标准为:CV>100%说明具有强变异性,10%≤CV≤100%为中等变异,CV<10%表示具有弱变异性。

1.4 数据处理

研究区土壤实测数据采用SPSS 22进行描述性分析、相关性分析和回归分析。1995—2015年年均温和年降水数据采用Excel 2016进行计算和处理。土地利用类型、土壤类型、土壤质地均采用ArcGIS 10.6按研究区采样点经纬度进行提取并计算。DEM数据采用ArcGIS 10.6依据栅格表层处理提取海拔、坡度、坡向等数据。有机碳的空间分布采用Kriging插值得到水平空间分布图,采用Canoco 5.0来探究有机碳的主控因子,运用Origin 8.5绘制所有图表。

2 结果与分析

2.1 不同草原类型土壤有机碳含量特征分析

表1为不同草原类型不同土层有机碳含量的描述性分析,如表1所示,对于同一土层深度,草甸草原土壤有机碳含量基本为最高,变异系数基本表现为荒漠草原>典型草原>草甸草原。草甸草原有机碳含量的最大值、最小值、平均值均随土壤深度的增加而减少,表层10 cm与中层和深层均呈显著性减少的趋势(P<0.05),而变异系数表现出相反的趋势,表现为40~50 cm>20~30 cm>0~10 cm,且都属于中等变异。这是由于在草甸草原区地表生物量多,使得土壤有机碳主要受地表植被和地下根系的影响,致使空间变异由表层至深层逐渐增大。典型草原不同土层深度的有机碳含量表现出与草甸草原相一致的变化趋势,均在表层与中层和深层之间具有显著性差异特征(P<0.05),中层与深层之间没有显著性差异。但是变异系数却不相同,表现为20~30 cm>40~50 cm>0~10 cm,可能是由于典型草原研究区面积较大,土壤类型基本以栗钙土为主,30 cm以下出现钙积层现象,使得有机碳含量在30 cm处出现分化,导致这一土层土壤有机碳含量特征相比于其表层和深层变化明显。荒漠草原不同土层深度的有机碳含量最大值、最小值、平均值均在20~30 cm土层深度数值最大,0~10 cm和40~50 cm土层有机碳含量差别不大,没有统一规律,说明荒漠草原在垂直方向上各土层之间含量差异不显著,影响作用程度不强,主要是荒漠草原大部分地面植被稀疏,地表裸露较多,土壤类型又多以风沙土为主,长时间的累积使土壤表层肥力贫瘠化,导致土壤表层有机碳含量略低于20~30 cm土层,但是未达到显著性差异。30 cm土层以下出现钙积层,从而使得有机碳含量低于20~30 cm土层。因此,致使20~30 cm土层深度有机碳最为丰富,由变异系数可知,0~10 cm变化最大,随土层深度增加,变异系数逐渐减少。

对比同一土层不同草原类型可得,在表层0~10 cm中各草原类型土壤有机碳在含量上存在显著差

表1 3种草原类型不同土层土壤有机碳一般性分析

Tab. 1 General analysis of soil organic carbon in different soil layers of three grassland types

草原类型	土层深度/cm	最小值/(g·kg^{-1})	最大值/(g·kg^{-1})	平均值/(g·kg^{-1})	标准差	变异系数/%
草甸草原	0~10	11.59	31.94	23.28a	6.34	27.35
	20~30	4.53	18.54	12.71c	4.28	33.71
	40~50	0.91	13.93	9.28cd	4.16	44.79
典型草原	0~10	6.10	30.10	16.75b	6.86	40.96
	20~30	4.12	19.13	10.75cd	4.92	45.79
	40~50	3.54	12.78	7.20d	3.02	41.88
荒漠草原	0~10	0.70	4.30	1.62e	1.11	68.27
	20~30	0.86	4.88	2.00e	1.15	57.63
	40~50	0.69	3.32	1.73e	0.84	48.48

注：不同字母表示在0.05水平上显著，相同字母表示在0.05水平上不显著。

异性(P<0.05)，在中层20~30 cm和深层40~50 cm表现出相似的变化特征，即草甸草原和典型草原之间均显示不显著的变化特点，但与荒漠草原均有显著性特征(P<0.05)，表明在同一土壤深度中，有机碳含量在草甸草原区和典型草原区含量差异变化较小，与荒漠草原区形成了鲜明的对比，这主要是由于地表植被盖度以及水分的差异所导致。

2.2 分层土壤有机碳含量空间分布特征

由锡林郭勒草原不同土层深度有机碳的含量特征可知(表2)，土壤有机碳均值表现为随土层深度的增加，含量逐渐降低。变异系数为0~10 cm>40~50 cm>20~30 cm，均属于中等变异程度，说明研究区有机碳表层0~10 cm，主要受地表生物量丰缺的影响，变化较为不稳定。中层20~30 cm和深层40~50 cm由于受土壤性质和土壤结构的影响，变化相较于表层较为稳定。经K-S检验，发现3层土壤有机碳均属于正态分布类型，可以进行普通克里格插值。

锡林郭勒草原各层土壤有机碳水平分布特征如图2所示。在0~10 cm土层深度，土壤有机碳含量由东向西呈条带状分布，且与3种草原类型分布相一致。在20~30 cm土层深度，有机碳含量呈块状分布，其中15~20 g·kg^{-1}呈飞地式分布，相比于0~10 cm土层，有机碳含量下降趋势较大。在深层土层40~50 cm，相比于0~10 cm、20~30 cm土层，土壤有机碳含量下降明显，且大部分为0~10 g·kg^{-1}，只有东部少数地区有机碳含量在10 g·kg^{-1}以上。纵观整个研究区，土壤有机碳含量特征与草原类型呈一致的分布特征，均表现为草甸草原含量最高，典型草原次之，荒漠草原最少。

2.3 分层土壤有机碳影响因素分析

为探明土壤有机碳含量变化特征的影响因素及其之间的相互作用，特选用地形因子(海拔、坡度、坡向)，气象因子(多年均温、多年均降水量)，土壤因子(土壤含水量)，土壤化学因子(pH、速效氮、速效磷、速效钾)等4种因子与不同土层有机碳含量之间做相关性分析，以此来探究土壤有机碳含量所受不同因子的作用影响程度。

2.3.1 分层土壤有机碳与地形因子的相关性分析

采用海拔、坡度、坡向3个地形因子与不同土层有机碳含量进行相关性分析，结果如表3所示，海拔与土壤有机碳具有负相关关系，且在20~30 cm、40~50 cm分别与海拔呈显著负相关(P<0.01)，表明在锡林郭勒草原土壤表层0~10 cm土壤有机碳受海拔影响作用小，表层土壤有机碳含量分布多受地表植被和枯枝落叶的影响。随着土层深度的增加，地表植被

表2 不同土层深度土壤有机碳一般性分析

Tab. 2 General analysis of soil organic carbon at different soil depths

土层深度/cm	平均值±标准差/(g·kg^{-1})	偏度	峰度	变异系数	K-S	分布类型
0~10	14.17±10.33	0.054	−1.351	72.917	0.096	正态分布
20~30	8.71±5.94	0.227	−1.273	68.178	0.190	正态分布
40~50	6.18±4.24	0.403	−0.950	68.573	0.200	正态分布

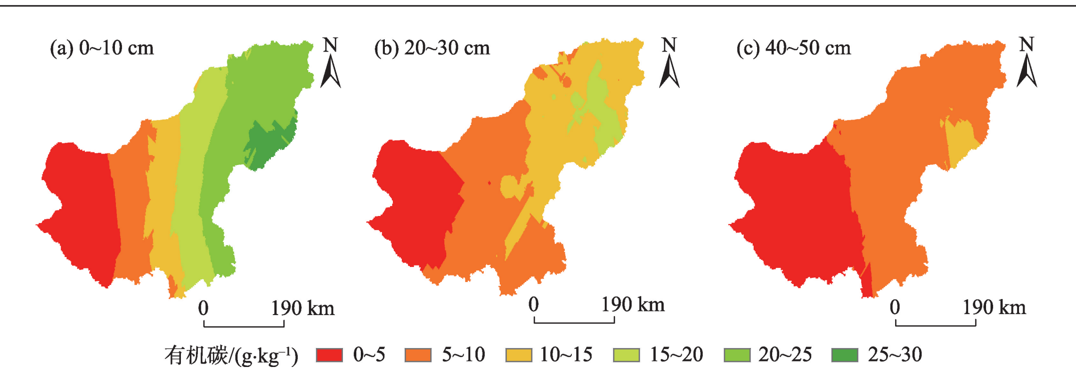


图2　不同土层土壤有机碳含量水平分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of soil organic carbon content in different soil layers

表3　分层土壤有机碳含量与pH、速效养分、地形因子之间的相关性检验

Tab. 3　Correlation test of organic carbon content and pH, available nutrients, topographic factors in stratified soil

土层深度/cm	pH	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	海拔/m	坡度/(°)	坡向
0~10	−0.789**	0.691**	0.531**	0.951**	−0.295	0.284	−0.151
20~30	−0.601**	0.701**	0.179	0.872**	−0.437*	0.225	−0.130
40~50	−0.518**	0.528**	0.032	0.866**	−0.385*	0.270	−0.162

注：*表示在双侧检验置信0.05水平显著，**表示在0.01水平上显著。

影响减弱，海拔成为一个制约因子，海拔越高，土壤有机碳含量越低。由图3a可知，锡林郭勒草原海拔在769~1936 m，海拔总体表现为东低西高，由于地表植被的分布差异致使表层土壤有机碳含量之间受海拔的影响小于地表枯枝落叶累积的影响。坡度与不同土层深度有机碳含量之间未达到显著性水平（P>0.05）。坡度主要通过影响地表淋溶作用和水分变化来影响土壤养分的含量特征。由图3b可知，研究区坡度大多集中在0°~2°，地势较为平缓，因此，很难与不同土层有机碳含量呈现明显的相关关系。

坡向与各层土壤有机碳均未达到显著性关系。这有可能是在锡林郭勒草原地区，地形多为山丘和平地，坡度变化较小，从而使得坡向对其植被的影响程度不大，使得其与有机碳含量没有显著性关系。王彦龙等[23]研究表明，坡向主要通过影响地区的降水、气温和光辐射分配，进而影响植被分布的长势和有机碳的含量。由于受到地形平坦和坡度小的原因，使得坡向出现不稳定性，坡向随时发生变化。在本研究区虽坡向可以改变水热条件和植被生长状况，但由于缺少长时间的作用特点，使

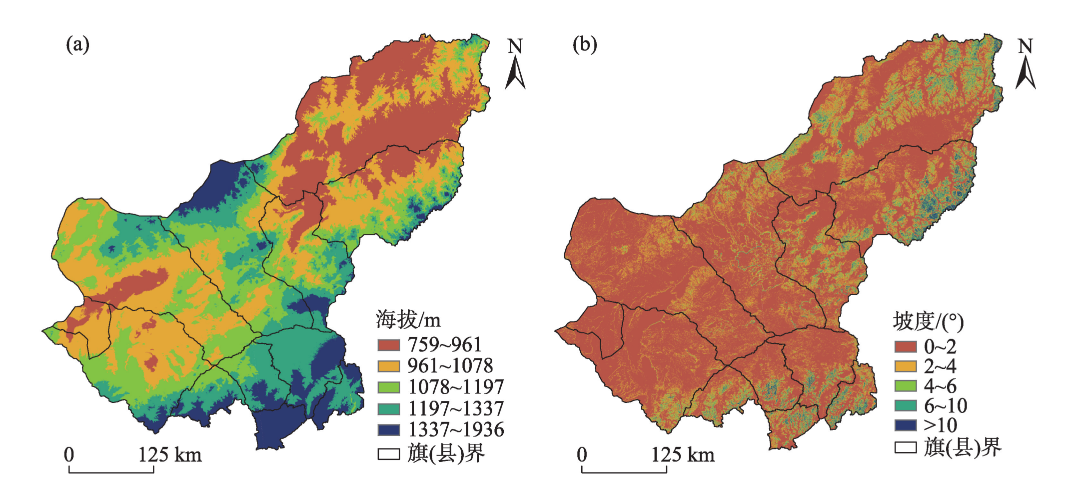


图3　研究区海拔和坡度空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of altitude and slope in the study area

得其对有机碳的影响程度较弱，并未达到显著性相关。这与贾豪等[24]对渝东南农田土壤有机碳与坡向的研究结果相类似。

2.3.2 分层土壤有机碳与气象因子的相关性分析 在研究土壤有机碳的影响因素中，对于自然环境因子的选择必不可少，因此，本文选择了该研究区1995—2015年的多年均温和多年降水数据来分析温度和降水对土壤有机碳含量的影响。

气候条件是形成不同草原类型分布和植被净初级生产力的主要因素之一，对不同草原的土壤养分含量具有重要的影响[20,25]。结果如图4所示，不同深度的土壤有机碳和气温之间呈极显著负相关性（$P<0.01$），随着土层深度的增加，R^2分别为0.756、0.631和0.553，温度对于土壤有机碳的影响随深度增加逐渐减弱，说明温度的变化对于土壤有机碳具有一定的制约作用，温度越高，土壤有机碳含量越少。气温的变化往往对土壤水分的蒸发、土壤矿物质的溶解和淀积，以及有机质的分解和腐殖质的形成都有重要的作用，进而促进了土壤中元素的迁移和转化，使得有机碳的累积量少，减少了有机碳的含量。通过对年降水量和不同土层有机碳含量之间做相关性分析可知，降水与分层土壤有机碳含量之间具有极显著的正相关关系（$P<0.01$），随着土层深度的增加，R^2的大小依次为0.791、0.562、0.497，相比于表层，降水对于深层土壤的影响减弱。由于降水可以影响土壤中颗粒物的分解与矿化，在大气—植被—土壤生态循环中，具有重要的地位。干旱半干旱地区降水稀少，下渗的水分被植物吸收蒸腾，土壤蒸发，随着土层深度的增加，土壤含水量少，导致深层土壤有机碳含量累积速率慢，从而影响了土壤有机碳的含量。气象因子主要通过对植被的生长发育、微生物的活动、迁移来影响土壤有机碳的变化[26]。

2.3.3 分层土壤有机碳与土壤含水量的相关性分析

土壤含水量对于土壤有机碳的作用主要表现在影响土壤中微生物的活性，抑制微生物分解土壤碳的能力，从而制约土壤有机碳的累积过程。土壤湿度越大，土壤呼吸作用就越弱，通气受阻，有机质的矿化作用越低，使得在碳循环过程中碳素的输入量大于输出量，利于有机碳含量的储积。本文主要将同土层的有机碳和土壤含水量做线性回归，结果如图5所示，同层土壤有机碳与土壤含水量之间均具有显著正相关关系（$P<0.05$），且相关性随着土层深度的增加而逐渐减小，依次为0.701、0.492、0.379。说明研究区土壤含水量是土壤有机碳的一个显著影响因子，土壤含水越多，土壤的通透性就越差，碳的释放就少，累积的就越多，这和对降水的研究相同，均为正相关关系，由此可见，有机碳含量的丰缺和水分之间有较大的关系，水分首先通过地表和地下淋溶作用影响着土壤碳循环，其次就是水分是促进植被生长的一个重要因子，植物生长越好，其根系越深，通过影响土壤微生物活动以及加速枯枝落叶的分解，来影响土壤有机碳含量多少。

2.3.4 分层土壤有机碳与土壤化学特征的相关性分析 土壤有机碳是土壤肥力的重要影响因子之一。探讨其与土壤氮磷钾有效性之间的相互作用

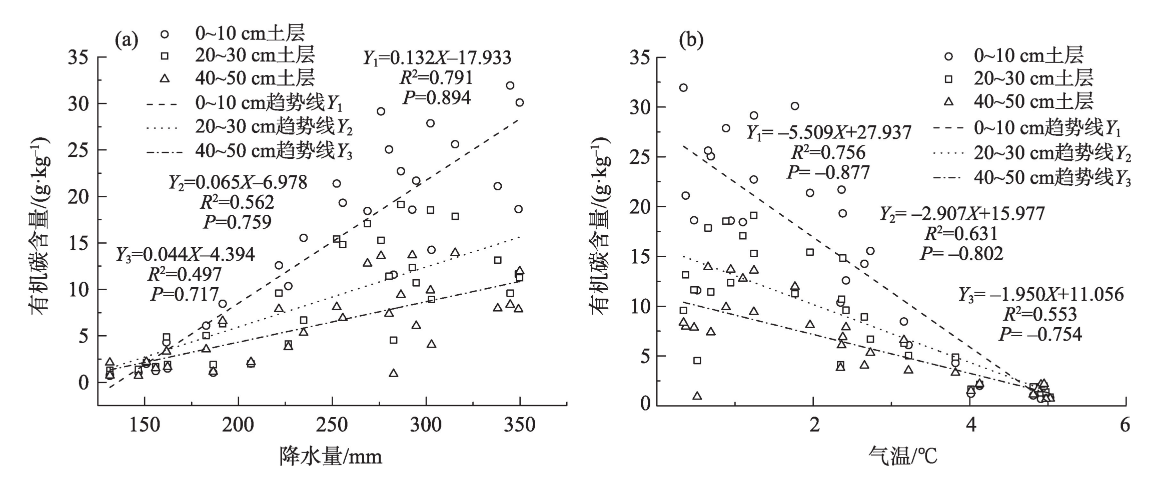


图4 分层土壤有机碳与年均温、年降水量之间的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between stratified soil organic carbon and average annual temperature and annual precipitation

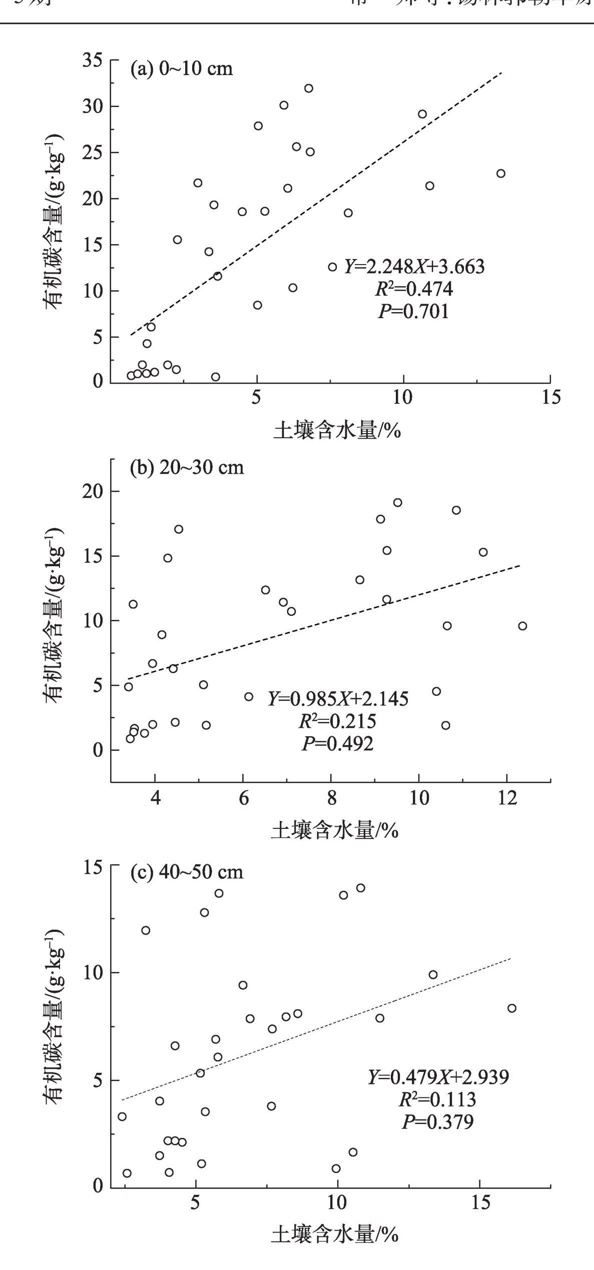


图5　不同土层有机碳与相同土层土壤含水量线性关系

Fig. 5　Linear relationship between organic carbon in different soil layers and soil water content in the same layer

关系,具有十分重要的地理意义。由表3可知,不同土层深度的土壤有机碳与其同层土壤pH之间具有极显著(P<0.01)负相关关系,并随着土层深度的增加,与pH之间的相关性逐渐减弱,说明土层深度越深,受pH的影响制约越少,土壤pH主要通过影响土壤动物和土壤微生物的活性及分解速度,从而影响有机碳含量多少的转化[27]。

土壤有机碳与速效磷之间具有极显著(P<0.01)正相关性。随着土层深度的增加,其相关性逐渐减弱。不同土层速效钾与土壤有机碳之间除了表层0~10 cm具有极显著正相关外(P<0.01),其余两层均无明显相关关系(P>0.05)。钾元素主要存在于表层土壤中,对有机碳的影响作用不明显,这与张丽君[28]等对浙江省耕地土壤速效钾研究结果相似。各层土壤有机碳与同层速效氮之间均具有极显著正相关性(P<0.01),且相关性相比于速效磷、速效钾都要高,说明速效氮与有机碳之间具有高度的正相关性。速效氮是土壤氮素的一个外在表现形式,土壤氮素一般以有机氮和无机氮两类为主。氮素是构成生物体内各种氨基酸的基础组成成分,土壤氮素是维持植物根系生长、发育的重要因子,可以促进植物根系对于土壤其他养分元素的吸收和利用。植物根系生长越好,越能促进土壤微生物的活性以及土壤碳氮循环,进而促进了土壤有机碳的积累和沉淀。

2.3.5　土壤有机碳主控因子分析　分析影响土壤有机碳的因子包括气象因子、地形因子、土壤含水量、土壤pH、以及土壤速效养分等因子,采用主成分分析方法探究各影响因子对土壤有机碳的影响程度。利用Canoco 5.0对影响土壤有机碳的10项指标进行了提取分析和处理,结果如图6所示。在众多影响因子中对有机碳的影响作用存在着明显的差异性。在速效养分对其土壤有机碳的影响过程中,速效氮对有机碳的影响程度最大,速效磷次之,速效钾最弱。降水对其土壤有机碳含量的影响作用较强于土壤含水量。在促进因子中,坡度呈现出较弱的影响作用。在抑制有机碳含量的影响因素中,气温对其产生了主要的影响,pH和海拔、坡向等因子影响程度基本相当。

由此可见,土壤有机碳除与氮素的累积有高度

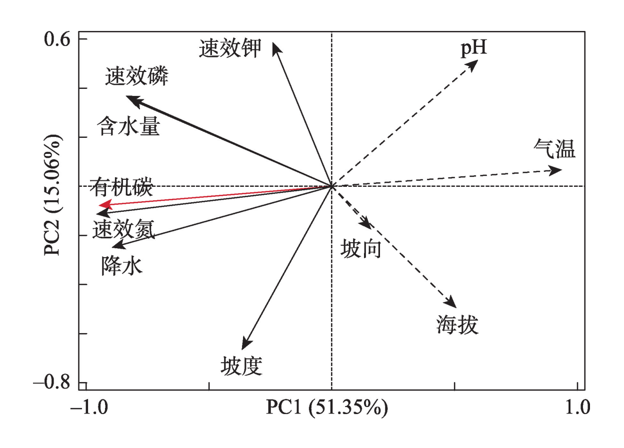


图6　土壤有机碳与影响因子的PCA分析

Fig. 6　PCA analysis of soil organic carbon and influencing factors

相关外,还与水热关系具有重要的作用。在自然状态下,气候因素中水分和热量的变化一般具有稳定性,因此,为了锡林郭勒草原土壤有机碳的均衡发展,应注重氮磷钾含量的变化以及土壤pH的调节。

3 讨 论

3.1 不同草原类型特征对土壤有机碳的影响因素

本文分析了土壤有机碳与气象因子、地形因子、土壤化学特征及土壤含水量等因子之间的相互作用关系。但是未对土壤质地、土壤类型和土地利用方式等分析研究,故将土壤质地按草原类型进行分类,进而探讨土壤物理特征对土壤有机碳的影响。

由图7所示,在3种草原类型中土壤质地均表现为砂粒>粉砂粒>黏粒,表明在锡林郭勒草原土壤质地组成主要为砂粒。砂粒占比最大的是荒漠草原,其砂粒占总砂粒的36.09%。在荒漠草原土壤粒径相比于其他草原类型大,土壤保水性差,土壤结构疏松,有机物质分解快,土壤有机质存蓄能力弱,土壤养分含量低下。在3种草原类型中,黏粒表现为草甸草原>典型草原>荒漠草原。草甸草原黏粒占总黏粒的36.29%,土壤黏粒越多,土壤表层有机物质越丰富,地表植物生长越好,土壤粒径越小,保水性越强,土壤微生物活动越好,越有助于土壤水分的保持与土壤碳循环,利于土壤有机碳含量的增加。由此可见,土壤质地也是影响土壤有机碳的一个重要因素,土壤质地的不同会对土壤容重以及土壤孔隙产生直接的影响[29]。

由图8a所示,锡林郭勒草原土壤类型大多数为钙层土(黑钙土、栗钙土和棕钙土等),从东到西钙

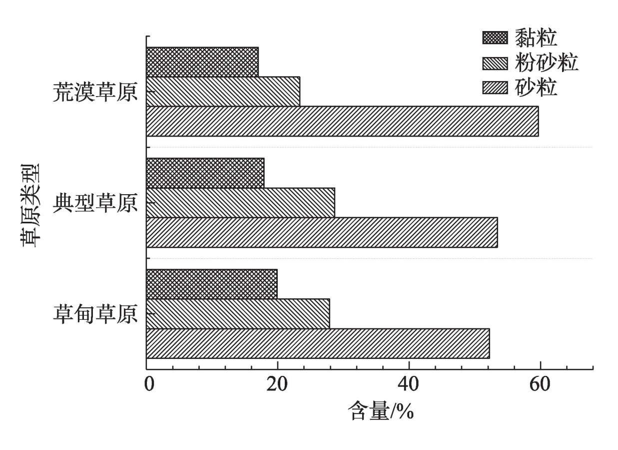


图7 不同草原类型土壤质地所占比例

Fig. 7 Proportion of soil texture of different grassland types

层土中夹杂着部分初育土,有向干旱土过渡的趋势。研究区钙层土分布较广,该区处于温带半干旱向干旱过渡的气候类型,适于土壤碳酸钙的积累,由东至西降水随着气候类型的过渡逐渐减少,植被类型也出现明显变化,土壤表层的腐殖质含量逐渐减少。在草原这一土地利用方式的大背景下,草本植物根系发育较浅,深层土壤受植物根系的影响较弱,此外从表层向下随着深度的增加,土壤钙积现象明显,基本在30 cm以下出现土壤钙积现象,不利于土壤有机质的累积与转化。因此,出现了表层有机碳含量多,越向下土壤有机碳含量骤减的现象。干旱土是发生在干旱水分条件下,具有干旱表层的土壤,一般这种土壤腐殖质含量低,地表植被稀少,且大多处于土壤缺水状态。干旱土土壤钙积过程较为明显,导致其土壤腐殖化过程极其微弱,进而影响了土壤有机碳的含量特征。南部农牧交错带有一部分东西走向的初育土,初育土是指土壤发育程度较弱,常由于人类不合理利用土地,造成土壤退化的现象,从而使原来发育较好的土壤演化为初育土。该初育土位置正好是锡林郭勒盟浑善达克沙地所在的一个沙带,大部分为风沙土,主要以草甸风沙土、草原风沙土以及荒漠风沙土为主。因此对于土壤有机碳的研究,土壤类型起着重要的基础作用,可以从根本上影响土壤有机碳含量的变化特征。

不同的土地利用方式会改变土壤本身的结构和土壤原本的循环机制,进而影响土壤养分含量的丰缺[30]。土地利用方式不同,受人类影响作用程度就不同[11]。由图8b中的土地利用类型分布图可知,锡林郭勒盟北部主要土地利用类型为草地,南部多为耕地类型,东南部分布有少数的林地,且有多个地方零星表现为未利用土地。结合土壤类型图可知,主要土地利用类型为草地,其主要土壤类型为钙层土,而钙层土的一个重要特性便是具有暗沃表层,这是草本植物生根的习性以及草类生长和土壤腐殖质循环的共同影响下形成的。草本植物的根系较浅,与森林植被不同,所以腐殖质的积累和沉淀也有所差异。对于草地这一利用类型来说,土壤腐殖质的积累主要靠草类植物地下的根系以及地表的植物残体分解形成,进而影响土壤碳循环,影响有机碳的含量。因此,不同土层土壤有机碳含量对于不同的土地利用类型,敏感性有所不同[3]。

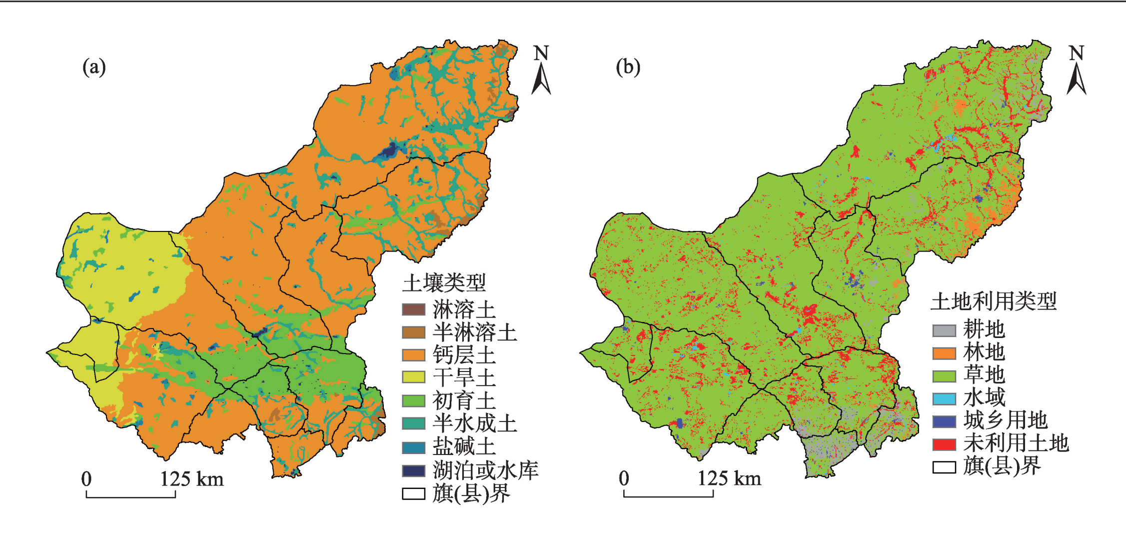


图8　研究区土壤类型与土地利用类型分布特征

Fig. 8　Distribution characteristics of soil types and land use types in the study area

3.2　气候、地形、土壤理化性质对土壤有机碳的影响

在土壤有机碳含量输入与输出的过程中,气候变化对土壤有机碳具有重要作用。不同的气候条件对植被类型和植物生物量有着不同的影响,从而间接决定着土壤有机碳输入量的变化;其次,土壤有机碳分解转化与输出过程,同样受水热关系的作用,不同的气温和降水影响着土壤中微生物的活性和数量变化,而在土壤不同深度中,微生物是分解和转化有机质的主要驱动要素,水分和热量的变化,一方面会影响植物光合作用的速率和植被生长所需的水分,从而影响植物的生产力,另一方面也有可能影响微生物的活性和分解转化的速度,影响土壤有机碳含量的累积[31]。在土壤生态系统中,土壤动物和微生物参与土壤有机质和能量的转化过程,有机物质不仅可以作为它们的食物来源,而且部分矿物质成分受到微生物活动和消化酶的作用,使其土壤中的有机质、氮素、交换性钙铝镁、有效性磷钾含量、盐基饱和度等会明显提高,这加速了土壤中有机质的转化速率,促进了有机碳的积累和提高了土壤养分的有效性。在对锡林郭勒草原的研究中发现土壤有机碳与年降水量具有显著正相关,而与气温呈显著负相关关系,这与在王淑平等[32]对东北样带土壤有机碳的研究结果相似,说明水热因子对土壤有机碳的含量变化特征具有明显作用。

地形的高低起伏会对土壤有机碳含量造成影响。不同的地形条件,会重新进行温度、水分和资源的分配。不同的海拔高度,土壤水分和热量会表现出不同的差异,因此对于土壤有机碳的影响也截然不同。除海拔外,坡向和坡度也会对土壤有机碳产生重要的影响,坡向的不同,植物光合作用的速率以及温度对于土壤水分的蒸发作用也不相同。坡度的大小会对土壤的物理特性产生作用,坡度越大,土壤表层水分流失越快,土壤机械组成会发生变化,继而对植物的生长以及微生物的活性产生影响。史飞等[33]在对不同土层有机碳含量随海拔的变化分析中得到,土壤表层0~5 cm有机碳含量随着海拔的升高而增加,在5~60 cm土层,有机碳含量随着海拔高度的增加具有先增加再下降的趋势。说明不同海拔高度对于土壤碳含量的影响不同。本研究显示,0~50 cm土壤有机碳与海拔具有显著负相关,这与史飞的研究结果不一致,原因一方面在于本文将表层、中层和深层有机碳含量均一化后,探究其与不同海拔的作用关系,另一方面,本文选取的研究区域为草原样地,主要植被类型为草地,东西跨度大,由东向西植物多样性逐渐减少,多种因子的交互作用,使得研究结果不同。说明在草原地区,对于土壤有机碳含量的影响因素来说,植物量的多少要比海拔的影响作用更显著。

土壤pH值是土壤的一个基本属性,也是影响土壤各种元素的重要化学指标,影响着各种化学元素的存在形态、有效状态和迁移转化能力。在强酸强碱的土壤环境下,会制约土壤微生物的活性,致使分解和转化土壤有机质的能力减弱,从而使其有机碳含量下降。王圜博等[34]在对黑河流域土壤有机碳的影响因素分析中,发现土壤pH与土壤有机碳之间具有显著负相关关系,与本研究结果相一

致，均得出pH值是制约土壤有机碳的一个重要影响因子。

总之，在锡林郭勒草原，土壤有机碳主要受气候、地形、土壤理化特性、生物量以及人为活动等因素的共同影响。在分析了自然因素和土壤理化性质的作用后，发现众多因子之间具有相互作用，对于土壤有机碳的影响存在复合性。人为活动对研究区土壤养分的影响主要表现在放牧和土地利用类型的变化。而对于天然草地而言，放牧是其主要的影响方式，放牧强度的不同对于草地的影响程度也就有所差异，放牧通过减少草原植被初级生产力，使得植被盖度降低，加速了土壤表层的风化作用，土壤养分含量降低，生物量的减少影响了土壤有机碳的输入过程。在牲畜的影响下，加速了土壤呼吸作用，促使碳素的转化与分解，从而影响土壤有机碳的含量[35]。要深入了解草地土壤有机碳的含量变化特征及影响因素，需要对各种影响因子进行细化，并分析其作用机理，以明确土壤有机碳储量及其与影响因子的作用关系，从而做出更加准确的判断和评估。

4 结 论

（1）锡林郭勒草原不同草原类型土壤有机碳含量变化幅度大，对于同一土层深度，基本为草甸草原>典型草原>荒漠草原。水平方向上，有机碳含量与植被类型分布相一致，呈由东南向西北逐渐递减的趋势，垂直方向上，土壤有机碳含量0~10 cm >20~30 cm >40~50 cm，且减少幅度较大。各层土壤有机碳均存在中等空间变异程度，且表现为0~10 cm > 40~50 cm >20~30 cm。

（2）土壤有机碳含量与气象因子、地形因子、土壤含水量和土壤化学特征均有相关性关系，其中与气温、海拔、pH均呈极显著负相关（P<0.01），与降水、土壤含水量、速效氮和有效磷均呈极显著正相关（P<0.01），与坡度、速效钾、坡向相关关系不显著（P>0.05）。

（3）对影响土壤有机碳含量的控制因子进行分析，主要影响因子为速效氮、降水和气温，次要影响因子为速效磷和土壤含水量。

参考文献（References）：

[1] 郝丽婷，吴发启. 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤养分特征与演变[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 16–22. [Hao Liting, Wu Faqi. Characteristics and evolution of soil nutrients of dam land and terrace in a loess hilly area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 16–22.]

[2] 李理, 朱文博, 刘俊杰, 等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 687–695. [Li Li, Zhu Wenbo, Liu Junjie, et al. Soil organic carbon heterogeneity and its influencing factors in Baotianman nature reserve [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29 (3): 687–695.]

[3] Batjes N H. Soil carbon stocks and projected changes according to land use and management: A case study for Kenya[J]. Soil Use and Management. 2004, 20(3): 350–356.

[4] Bouma J J W. Doran A J. Jones Methods for assessing soil quality SSSA special publication No.49 1996 soil science society of America London, England[J]. Scientia Horticulturae, 1997, 70(4): 355–356.

[5] 李灵, 张玉, 卢晓燕, 等. 武夷山市茶园土壤有机质的空间分布特征[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2019, 16(11): 60–65, 67. [Li Ling, Zhang Yu, Lu Xiaoyan, et al. Spatial distribution of soil organic matter in tea gardens of Wuyishan City[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2019, 16(11): 60–65, 67.]

[6] 谭海燕, 童江云, 包涛, 等. 昆明市滇池片区耕地土壤养分含量空间分布及变化情况分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(7): 1614–1620. [Tan Haiyan, Tong Jiangyun, Bao Tao, et al. Analysis on temporal and spatial variation of soil nutrient content in dianchi district of Kunming City[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(7): 1614–1620.]

[7] 王勇辉, 焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5893–5901. [Wang Yonghui, Jiao Li. The characteristics and storage of soil organic carbon in the Ebinur lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5893–5901.]

[8] 胡莹洁, 孔祥斌, 姚静韬. 北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 561–570. [Hu Yingjie, Kong Xiangbin, Yao Jingtao. Vertical distribution of soil organic carbon in plains areas of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 561–570.]

[9] 马和平, 东主. 西藏色季拉山北坡表层土壤有机碳垂直分布特征研究[J]. 高原农业, 2020, 4(2): 115–122. [Ma Heping, Dong Zhu. Vertical distribution characteristics of surface soil organic carbon on the north slope of Sygera Mountains, Tibet[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2020, 4(2): 115–122.]

[10] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖高寒湿地土壤有机碳含量变化特征分析[J]. 土壤, 2013, 45(3): 392–398. [Cao Shengkui, Cao Guangchao, Chen Kelong, et al. Characteristics of alpine wetland soil organic carbon variations around Qinghai Lake[J]. Soils, 2013, 45(3): 392–398.]

[11] Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, et al. Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2014, 115(11): 19–28.

[12] 朱猛, 冯起, 张梦旭, 等. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1322–1329. [Zhu

Meng, Feng Qi, Zhang Mengxu, et al. Patterns and influencing factors of soil organic carbon in grasslands of the middle Qilian Mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1322-1329.]

[13] 张智博, 刘涛, 伍青山, 等. 东平湖湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 92-96, 147. [Zhang Zhibo, Liu Tao, Wu Qingshan, et al. Distribution characteristics and influencing factors of organic carbon content in soil of Dongping Lake wetland[J]. Yellow River, 2019, 41(7): 92-96, 147.]

[14] 李兰花, 杨勇, 萨仁格日勒. 内蒙古典型草原土壤有机碳与土壤理化性质的关系[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(19): 68-70. [Li Lanhua, Yang Yong, Sarengerile. Soil organic contents in relation to soil physic-chemical properties in typical steppe of Inner Mongolia[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(19): 68-70.]

[15] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素——以后寨河喀斯特小流域为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1056-1067. [Huang Xianfei, Zhou Yunchao, Zhang Zhenming, Characteristics and affecting factors of soil organic carbon under land uses: A case study in Houzhai River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1056-1067.]

[16] 李龙, 周飞, 田杰, 等. 地形因子对半干旱地区土壤有机碳含量的影响[J]. 北方园艺, 2019, 43(16): 104-109. [Li Long, Zhou Fei, Tian Jie, et al. Effects of topographic factors on soil organic carbon content in semi-arid regions[J]. Northern Horticulture, 2019, 43(16): 104-109.]

[17] 丰思捷, 赵艳云, 李元恒, 等. 内蒙古典型草原表层土壤有机碳储量差异及影响因素[J]. 中国草地学报, 2019, 41(2): 116-120. [Feng Sijie, Zhao Yanyun, Li Yuanheng, et al. The differences and influencing factors of topsoil organic carbon storage in typical steppe of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2): 116-120.]

[18] Motavalli P P, Palm C A, Parton W J, et al. Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: Evidence from laboratory and simulation studies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(12): 1589-1599.]

[19] 商泽安, 宋涵晴, 舒琪, 等. 海南岛甘什岭低地次生雨林土壤有机碳及影响因素[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 297-304. [Shang Ze'an, Song Hanqing, Shu Qi, et al. Soil organic carbon distribution and the influencing factors in the tropical lowland secondary rainforest of ganshiling, Hainan Island[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(2): 297-304.]

[20] 曹立国, 刘普幸, 张克新, 等. 锡林郭勒盟草地对气候变化的响应及其空间差异分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 789-794. [Cao Liguo, Liu Puxing, Zhang Kexin, et al. Analysis on response of grasslands to climate change and its spatial difference in Xilingol League[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 789-794.]

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-114. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 22-114.]

[22] 马梓策, 于红博, 曹聪明, 等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1310-1321. [Ma Zice, Yu Hongbo, Cao Congming, et al. Spatiotemporal characteristics of fractional vegetation coverage and its influencing factors in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1310-1321.]

[23] 王彦龙, 王晓丽, 马玉寿. 坡向对长江源区高寒草地植被生长和土壤养分特征的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(10): 2336-2346. [Wang Yanlong, Wang Xiaoli, Ma Yushou. Effect of slope aspect on vegetation growth and soil nutrient characteristics of alpine grassland in the source region of Yangtze River[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(10): 2336-2346.]

[24] 贾豪, 严宁珍, 程永毅, 等. 渝东南农田土壤有机碳空间分布特征及影响因素[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1256-1263. [Jia Hao, Yan Ningzhen, Cheng Yongyi, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil organic carbon in farmland in southeast Chongqing[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6): 1256-1263.]

[25] 郝璐, 吴向东. 内蒙古草地生产力时空变化及驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 577-582. [Hao Lu, Wu Xiangdong. Analysis on the spatiotemporal change of steppe productivity and its driving factors in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(4): 577-582.]

[26] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 等. 河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 937-948. [Cao Xianghui, Long Huaiyu, Zhou Jiaogen, et al. Analysis of spatial variability and influencing factors of topsoil organic carbon and total nitrogen in Hebei Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(4): 937-948.]

[27] 景建生, 刘子琦, 罗鼎, 等. 喀斯特洼地土壤有机碳分布特征及影响因素[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 133-139. [Jing Jiansheng, Liu Ziqi, Luo Ding, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in karst depression[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(2): 133-139.]

[28] 张丽君, 麻万诸, 项佳敏, 等. 浙江省耕地土壤速效钾状况及影响因素分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(4): 607-611. [Zhang Lijun, Ma Wanzhu, Xiang Jiamin, et al. Soil available potassium status and its influencing factors in cultivated land of Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(4): 607-611.]

[29] 何洪盛, 田青, 王理德, 等. 青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 223-232. [He Hongsheng, Tian Qing, Wang Lide, et al. Study on vegetation community characteristics and soil physical and chemical properties of abandoned land in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 223-232.]

[30] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226. [Liu Mengyun, Chang Qingrui, Qi Yanbing, et al. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 218-226.]

[31] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 土壤, 2011, 43(4): 515-524. [Wang Shufang,

Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in upstream watershed of Miyun Reservoir in North China[J]. Soils, 2011, 43(4): 515–524.]

[32] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2002, 48(5): 513–517. [Wang Shuping, Zhou Guangsheng, Lyu Yucai, et al. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along northeast China transect (NECT) and their relationships with climatic factors[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 48(5): 513–517.]

[33] 史飞, 徐梦, 张旭博, 等. 藏东南色季拉山西坡不同植被土壤有机碳垂直分布特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 942–953. [Shi Fei, Xu Meng, Zhang Xubo, et al. Vertical distribution of soil organic carbon and influential factors along vegetation transect on west slope of Mount Segrila, southeastern Tibet[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 942–953.]

[34] 王園博, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 833–844. [Wang Yuanbo, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(5): 833–844.]

[35] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469–476. [Fu Hua, Chen Yaming, Wang Yanrong, et al. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(3): 469–476.]

Distribution characteristics of soil organic carbon in Xilin Gol steppe and its influencing factors

CHANG Shuai[1], YU Hongbo[1], CAO Congming[1], MA Zice[1,2],
LIU Yuexuan[1], LI Xiang[1]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;
2. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241199, Anhui, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an important indicator of soil nutrient content and quality. The study of SOC in different steppe types assists ecological restoration and rational land use projects. This study was conducted in the Xilin Gol steppe, and used the Kriging interpolation, correlation analysis, unary linear regression, and principal component analysis to explore the spatial differentiation of SOC and identify its influencing factors. The results showed that: (1) In the meadow steppe, SOC content in 0–10 cm, 20–30 cm, and 40–50 cm soil layers was 23.28 $g \cdot kg^{-1}$, 12.71 $g \cdot kg^{-1}$, and 9.28 $g \cdot kg^{-1}$, respectively; in the typical steppe it was 16.75 $g \cdot kg^{-1}$, 10.75 $g \cdot kg^{-1}$, and 7.20 $g \cdot kg^{-1}$, respectively; in the desert steppe, the content was 1.62 $g \cdot kg^{-1}$, 2.00 $g \cdot kg^{-1}$, and 1.73 $g \cdot kg^{-1}$, respectively. Also, results showed that the SOC content in the meadow and typical steppes gradually decreased with the increase of soil depth, while there was no significant difference between different soil layers in the desert steppe. (2) Different steppe types had different influences on SOC content. For the same soil layer depth, the SOC content order was basically meadow steppe>typical steppe>desert steppe. The SOC content in the horizontal direction was consistent with the distribution of vegetation coverage, showing a trend of gradual decrease from southeast to northwest. (3) Correlation analysis showed that SOC was significantly ($P<0.01$) and negatively correlated with altitude, temperature, and pH; and significantly ($P<0.01$) and positively correlated with precipitation, soil water content, available nitrogen, and available phosphorus. It had no significant correlation ($P>0.05$) with slope, aspect, and available potassium. (4) The main factors affecting SOC were available nitrogen, precipitation, and temperature; the secondary factors were soil water content and available potassium. Therefore, attention should be paid to the control of nitrogen intake and hydrothermal conditions in different steppe types.

Keywords: soil organic carbon; distribution characteristics; influencing factors; Xilin Gol steppe